



TITLE:

酸化ガリウムのヘテロエピタキシ
ャル成長と物性およびショットキ
ーバリアダイオードの研究(
Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

織田, 真也

CITATION:

織田, 真也. 酸化ガリウムのヘテロエピタキシャル成長と物性およびシ
ョットキーバリアダイオードの研究. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-07-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20628>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2018-01-
01に公開

京都大学	博士 (工 学)	氏名	織 田 真 也
論文題目	酸化ガリウムのヘテロエピタキシャル成長と物性 およびショットキーバリアダイオードの研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、コランダム構造酸化ガリウム ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) が高耐圧・低損失のパワーデバイスとして有用な物性を持つことに着目し、デバイス品質の結晶成長、ドーピングとともに、ショットキーバリアダイオード (SBD) への応用を目指して行った研究をまとめたもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、パワーデバイス用の各種半導体材料の中で$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$が持つ特徴を概観し、そのパワーデバイス応用に向けて解決すべき課題を述べて、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第2章では、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$の結晶成長に MIST EPITAXY®法を開発したこと、また得られた薄膜の特性とドーピング効果について述べている。前駆体としてカーボンフリーである臭化物を利用して、優れた結晶性、表面平滑性を持ち、C や Cl 等の不純物混入量が 10^{17} cm^{-3} 以下の$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$薄膜を実現したことを示している。さらに、Ge ドーピングを提唱し、広範なキャリア濃度制御 ($4 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) を達成している。</p> <p>第3章では、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$の格子定数について、X線を用いた評価結果について述べている。MIST EPITAXY®法で得られた$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$自立片は、高圧合成により得られたものと同じ格子定数を持ち、c面サファイア ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) 上の$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$薄膜の格子定数は、応力フリーのものと良く一致していることを示している。この結果から、成長の極めて初期段階で緩和が起こり、非コヒーレントモードで成長していると指摘している。</p> <p>第4章では、各種面方位サファイア上の結晶成長と評価結果について述べている。a面、m面、r面すべてで$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$薄膜を成長でき、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$の結晶方位は$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$と一致していることを述べている。また、CAICISS 分析から、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$と$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$には表面構造にもアナロジーがあることを示唆している。電気特性ではc軸、a軸、m軸の3方向で比抵抗率に$\pm 20\%$程度の差しかなく、高キャリア濃度の$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$は比較的等方的な電気特性を持つことを指摘している。また、m面$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$では、移動度 $113 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という先行研究と比較して非常に高い値を達成している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	織田 真也
<p>第5章では、高耐圧デバイスへの展開を念頭に、クラックの発生を抑えて厚膜成長を行う手法に関して検討した結果を述べている。$(\text{Al,Ga})_2\text{O}_3$ バッファ層を導入する方法を提案し、その効果で $5\text{ }\mu\text{m}$ 程度の膜厚を実現して、これが 1760 V 耐圧の SBD 試作につながる成果であると指摘している。また、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の格子定数に変化は認められなかったことを示している。さらに、熱応力は引張り応力であること、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$/サファイア界面に引張り応力がかかっている傾向を明らかにした。これは、バッファ層の挿入に伴い、熱応力を緩和する応力が誘起されたためと推察している。</p> <p>第6章では、SBD を試作して、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の応用に向けた展望を述べている。サファイア基板上に n^+、n 層を積層して電極を付ける構造を用い、本研究で得られた膜の特性をベースに、n^+ 層の厚みを $3\text{ }\mu\text{m}$ 程度にすることで、低抵抗なデバイスを実現することが可能であることを計算により示している。$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を基板から剥離する技術を見出して縦型 SBD を試作し、n 層の厚さが $0.4\text{ }\mu\text{m}$ のもので $0.1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$、$\text{n}^+$ 層の厚さが $2.6\text{ }\mu\text{m}$ のもので、$0.4\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ という特性オン抵抗が低いデバイスを実証している。逆方向特性は未だリーク電流が多いものの、それぞれ 531 V、855 V までブレイクダウンが発生しない結果を得ている。さらに、実装された SBD で優れた高周波特性、低い熱抵抗を示し、今後の実用的な応用につながる基礎特性を明らかにしている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、研究成果の波及効果および今後の展開について提言を行っている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、コランダム構造酸化ガリウム ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) が高耐圧・低損失のパワーデバイスとして有用な物性を持つことに着目し、デバイス品質の結晶成長、ドーピングとともに、ショットキバリアダイオード (SBD) への応用を目指して行った研究をまとめたものであり、主な成果は次のとおりである。

1. 結晶成長法として MIST EPITAXY®法を開発し、前駆体としてカーボンフリーである臭化物を利用することで、優れた結晶性、表面平滑性を持ち、C や Cl 等の不純物混入量が 10^{17} cm^{-3} 以下の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を実現した。さらに、Ge ドーピングを提唱し、広範なキャリア濃度制御 ($4 \times 10^{17} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) を達成した。
2. MIST EPITAXY®法で得られた $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 自立片は、高圧合成により得られたものと同じ格子定数を持ち、c 面サファイア上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の格子定数は、応力フリーのものと良く一致していることを示した。この結果から、成長の極めて初期段階で緩和が起り、非コヒーレント成長で成長していることを明らかにした。
3. a 面、m 面、r 面サファイア基板上で、基板と同じ結晶方位をもって $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長することを示し、両者の表面構造にアナロジーがあることを見出した。また、高キャリア濃度の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は比較的等方的な電気特性を持つことを明らかにした。m 面 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は、移動度 $113 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ という先行研究と比較して非常に高い値を達成した。
4. 高耐圧デバイスに向け、クラックの発生を抑えて厚膜成長を行う手法に関して検討し、 $(\text{Al,Ga})_2\text{O}_3$ バッファ層の効果で $5 \mu\text{m}$ 程度の膜厚を実現した。また、バッファ層の挿入に伴い、熱応力を緩和する応力が誘起されたことを示した。
5. サファイア基板上に成長した $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を基板から剥離する技術を見出して縦型 SBD を試作し、n 層の厚さが $0.4 \mu\text{m}$ 、 $2.6 \mu\text{m}$ のもので、特性オン抵抗はそれぞれ $0.1 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $0.4 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と低く、逆方向特性は未だリーク電流が多いものの、それぞれ 531 V 、 855 V までブレイクダウンが発生しない結果を得た。さらに、実装された SBD で優れた高周波特性、低い熱抵抗を示し、今後の実用的な応用につながる基礎特性を明らかにした。

以上、本論文は、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を用いた高耐圧・低損失パワーデバイスにつなげる基盤技術を築いたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 2 月 10 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規定第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。